

УДК 550.47

А.А. Усачева¹, И.Н. Семенов², А.Ю. Мирошников³, В.В. Крупская⁴, С.В. Закусин⁵

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АРКТОТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ НОВОЙ ЗЕМЛИ

В почвах арктотундровых ландшафтов Новой Земли исследованы основные морфологические и физико-химические особенности почв: минеральный и элементный состав, величина pH, содержание $C_{\text{орг}}$ и его фракционно-групповой состав, радиационное состояние. В почвах доминируют кварц и полевые шпаты, в кислой среде формируются педогенные иллит и каолинит; содержится среднее и высокое количество гумуса гуматно-фульватного состава. Почвообразующие породы побережья заливов Абросимова и Степового относительно кларков литосферы обогащены Fe, Ti, Cr, V, Ni, As и обеднены P, S, Rb, Sr, Ba, Th, Nb, Cl. Растения арктотундровых ландшафтов аккумулируют S, P, Cl, Sr и Zn. Удельная активность природных изотопов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K увеличивается в ряду растительность→почвы→донные осадки. В растениях, почвах и донных осадках активность ^{137}Cs варьирует в пределах 10–350, 1–310 и 0–26 Бк/кг соответственно.

Ключевые слова: катена, петрозем, литозем, тяжелые металлы, радионуклиды, глинистые минералы, иллит, каолинит, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th .

Введение. В настоящее время в России еще остались слабо изученные геохимические ландшафты, например, арктотундровые и примитивно-пустынные Новой Земли, исследование которых было затруднено из-за того, что здесь с 1954 г. находился Северный испытательный полигон. Радиоактивное загрязнение архипелага определяется тем, что испытания проводили только при ветрах северного, северо-восточного, восточного или юго-восточного направлений на всем протяжении слоя воздуха от поверхности земли и до высоты подъема верхней кромки ядерного гриба [Михайлов, 2006]. Существуют различные оценки активности ^{137}Cs , поступившего в виде местных выпадений на острова Новой Земли: 30 ПБк в результате 87-ми ядерных испытаний [Aarkrog, 1997] и 96–148 ПБк от 9 наиболее крупных взрывов в августе–октябре 1962 г. [Мирошников, 2012]. В донных осадках побережья архипелага выявлены зоны повышенной активности ^{137}Sr , сформировавшиеся на геохимическом барьере зоны смешения морских и пресных вод в результате выноса радионуклидов из ледников и ландшафтов Новой Земли [Иванов, 2002; Мирошников, 2012]. Радиационное состояние сухопутной территории архипелага почти не изучено. Первые данные об уровне активности ^{137}Cs в ландшафтах о. Южный появились в открытой печати недавно [Лаверов и др., 2016]. Для прогноза изменений ландшафтов Арктики, как одних из наиболее уязвимых при меняющемся кли-

мате, необходимо наличие данных о содержании и особенностях миграции элементов в высокоширотных регионах.

Цель работы – изучение геохимических особенностей ландшафтов восточного побережья Новой Земли и распределения в них радиоактивных изотопов, макро- и микроэлементов. Эти исследования актуальны, так как практически отсутствуют работы, посвященные ландшафтно-геохимическим особенностям архипелага, радиационному состоянию ландшафтов и закономерностям миграции и аккумуляции в них макро- и микроэлементов [Горячкин, 2010; Лаверов и др., 2016].

Материалы и методы исследований. В августе–сентябре 2014 г. исследовано 4 участка на восточном побережье о. Северный и Южный (рис. 1). На побережьях заливов Степового с арктотундровыми слабокислыми ландшафтами и Абросимова с арктотундровыми кислыми ландшафтами отбирали растения (11 проб), почвы (22) и донные осадки (21) в заливах. В заливах Цивольки и Благополучия и на их побережьях с примитивно-пустынными ландшафтами мохово-лишайниковых пустошей [Перельман, Касимов, 1999] отбирали растения (2) и донные осадки (36).

Актуальную кислотность (pH), углерод органических веществ ($C_{\text{орг}}$) и потерю массы при прокаливании (ппп) определяли по стандартным методикам [Аринушкина, 1970], групповой и фракционный

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии, мл. науч. с.; e-mail: usacheva@list.ru

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии, мл. науч. с.; e-mail: semenkov@igem.ru

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии, ст. науч. с.; e-mail: almir@igem.ru

⁴ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, лаборатория кристаллохимии минералов, ст. науч. с.; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, ст. науч. с.; e-mail: vi_kru@bk.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, вед. инж.; Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, лаборатория кристаллохимии минералов, мл. науч. с.; e-mail: sergeyzakusin@gmail.com

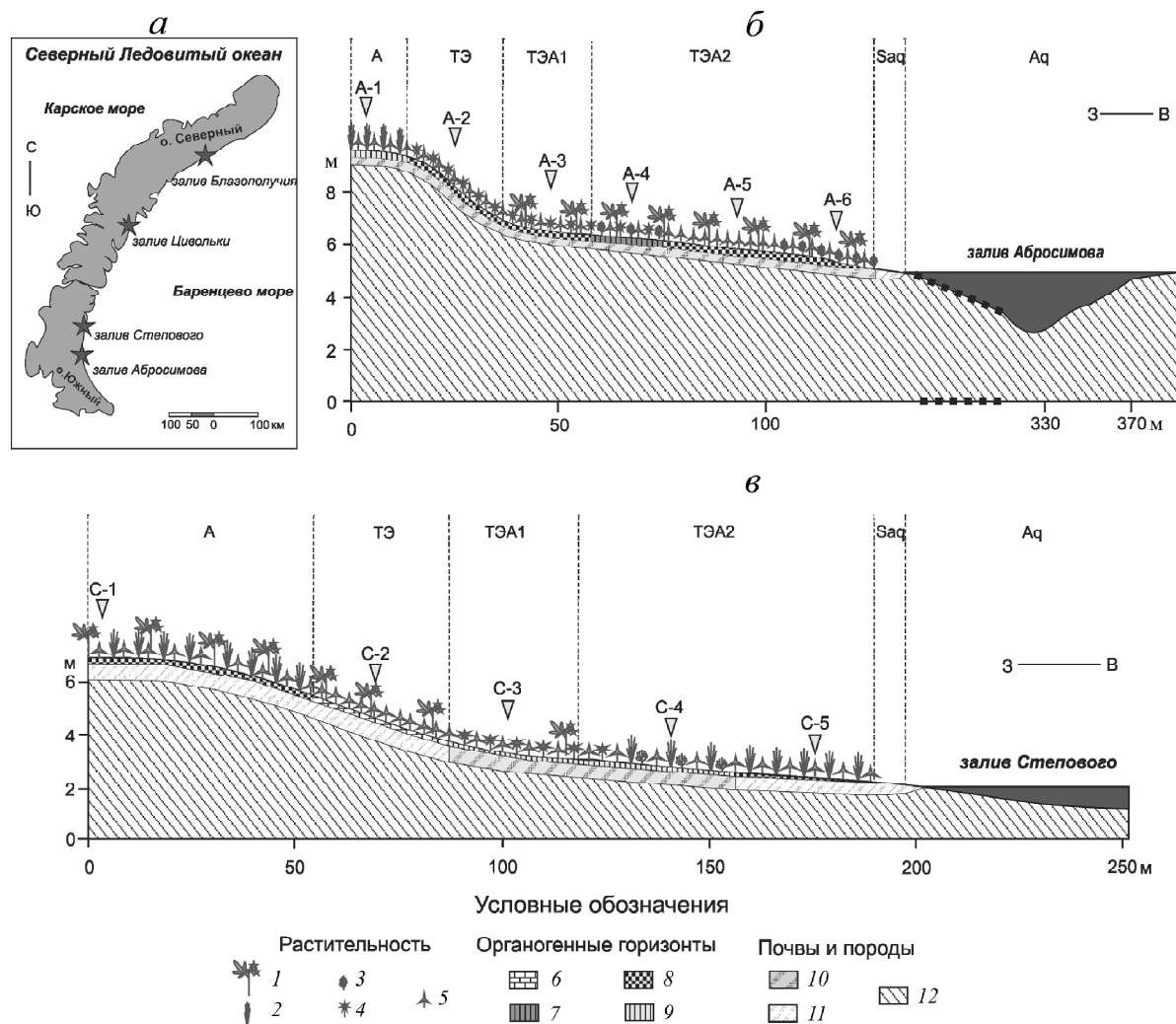


Рис. 1. Ключевые участки (а) и места отбора проб почв и растений на побережьях заливов Абросимова (б) и Степового (в): 1 – кустарнички, 2 – осоки, 3 – *Cladonia*, 4 – *Polytrichum*, 5 – зеленые мхи *Dicranum* и *Aulacomnium*, 6 – торфяной, 7 – перегнойно-темногумусовый, 8 – грубогумусовый, 9 – серогумусовый, 10 – литоземы, 11 – петроземы, 12 – сланцы. Номера почвенных разрезов на побережье заливов: Абросимова – А-1-5; Степового – С-1-5. Элементарные ландшафты: А – автономный, ТЭ – трансэлювиальный, ТЭА1 – трансэлювиально-аккумулятивный подножия склона, ТЭА2 – трансэлювиально-аккумулятивный, Saq – супераквальный, Aq – аквальный

Fig. 1. Key areas on the Novaya Zemlya east coast (a) and sampling points of soil and plants on the coast of Abrosimov (b) and Stepovoy bays (v): 1 – shrubs, 2 – sedges, 3 – *Cladonia*, 4 – *Polytrichum*, 5 – green mosses *Dicranum* and *Aulacomnium*, 6 – folic, 7 – mollic, 8 – coarse humus, 9 – umbric, 10 – litozems, 11 – petrozems, 12 – schists. Numbers of soil profiles on the coasts of: Abrosimov Bay – A-1-5; Stepovoy Bay – C-1-5. Elementary landscapes: autonomous – A, trans-eluvial – ТЭ, trans-eluvial-accumulative of the slope base – ТЭА1, trans-eluvial-accumulative – ТЭА2, super-aqual – Saq, aquatic – Aq

состав гумуса – по методу Тюрина в модификации Пономаревой и Плотниковой [Орлов и др., 1996] в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; количественный минеральный анализ – методом рентгеновской дифракции на приборе «Ultima-IV» на геологическом факультете МГУ. Удельная активность ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th измерена методом прямой гамма-спектрометрии на низкофоновом гамма-спектрометрическом комплексе с полупроводниковым Ge(Li) детектором GEM-4519 (GLP-25300/13) и 8000-канальным амплитудным анализатором 919 EG&G «ORTEC» (аналитики А.Л. Керзин и Р.В. Соломенников), элементный состав – рентген-флуоресцентным методом на вакуумном спектрометре «PANalytical» последовательного действия с диспер-

сией по длине волны (аналитик А.И. Якушев) в ИГЕМ РАН.

Для характеристики содержания химических элементов в почвах и растениях составлены ряды биологического поглощения по значениям коэффициента Ax – отношению содержания металлов в золе растений к их содержанию в почве. Содержание элементов в почвообразующих породах сравнивали с кларками литосферы А.П. Виноградова [1962] и Н.А. Григорьева [2009] для отдельных элементов, наиболее часто используемых для большинства рассматриваемых элементов [Касимов, Власов, 2015]. Латеральное распределение химических элементов в почве оценивали с помощью коэффициента латеральной дифференциации (L).

Результаты исследований и их обсуждение.

Характеристика компонентов ландшафтов. На каменистых россыпях побережья залива Благополучия развиты ландшафты с накипными лишайниками на почвопленках, на побережье залива Цивольки – мохово-кустарничковых тундр на петроземах типичных мощностью несколько сантиметров.

На побережье залива Цивольки в примитивно-пустынных ландшафтах доминируют мхи рода *Politrichum*, образующие кочки высотой 3–8 см и диаметром 10–25 см, покрывающие до 40% площади, встречаются отдельные особи мышиного горошка (*Vicia cracca*), арктоуса альпийского (*Arctous alpina*) и кладонии (*Cladonia sp.*), занимающие суммарно <15% площади проекции растительного покрова при общей задернованности ≤60%. Щебень коренных пород, не занятый высшей растительностью, практически полностью покрыт накипными лишайниками.

На побережьях заливов Степового и Абросимова в арктотундровых ландшафтах распространены более сомкнутые и сложные кустарничково-лишайниково-моховые сообщества (*Carex-Cladonia-Dicranum-Polytrichum-Aulacomnium*) на петроземах и литоземах. В арктотундровых слабокислых ландшафтах степень проективного покрытия мхов увеличивается от повышенных элементов рельефа к пониженным с 10 до 80%, кустарничков – уменьшается с 80 до 5%. В арктотундровых кислых ландшафтах *Aulacomnium sp.* тяготеет к повышенным местообитаниям, *Cladonia sp.* – к пониженным. Степень проективного

покрытия мхов варьирует от 40 до 90% (в среднем 70%). Из-за более интенсивного выветривания пород почвы на берегах залива Абросимова мощностью 10–15 см содержат больше мелкозема, чем менее мощные почвы с профилем до 10 см на более северном побережье залива Степового (50–70 и 30–40% соответственно). Под живым мхом сформировались маломощные органогенные и органоминеральные горизонты, залегающие, как правило, сразу на материнских породах или их дериватах (щебнистый сланец), реже – на переходных к породе горизонтах. Верхние 2–3 см почв о. Южный обильно переплетены корнями, за счет чего их серогумусовый горизонт имеет средневыраженную непрочную мелкокомковатую или комковато-зернистую структуру.

В почвах побережья залива Абросимова реакция среды сильнокислая–кислая: pH по всему профилю изменяется в пределах 4,0–4,5 ($n=9$). Из-за более интенсивного разложения органических веществ и формирования гумусовых кислот в ландшафтах более южного побережья залива Степового среда слабокислая: pH варьирует от 5,3 до 6,9 ($n=11$). В оторфованной части почв, как правило, значения pH выше, чем в минеральной, из-за аэрогенного поступления щелочных соединений с морской водой, что подтверждается повышенным содержанием Cl в почвах относительно пород.

Органогенные и органоминеральные горизонты теряют при прокаливании 8–89% массы (рис. 2). В составе органических веществ фульвокислоты

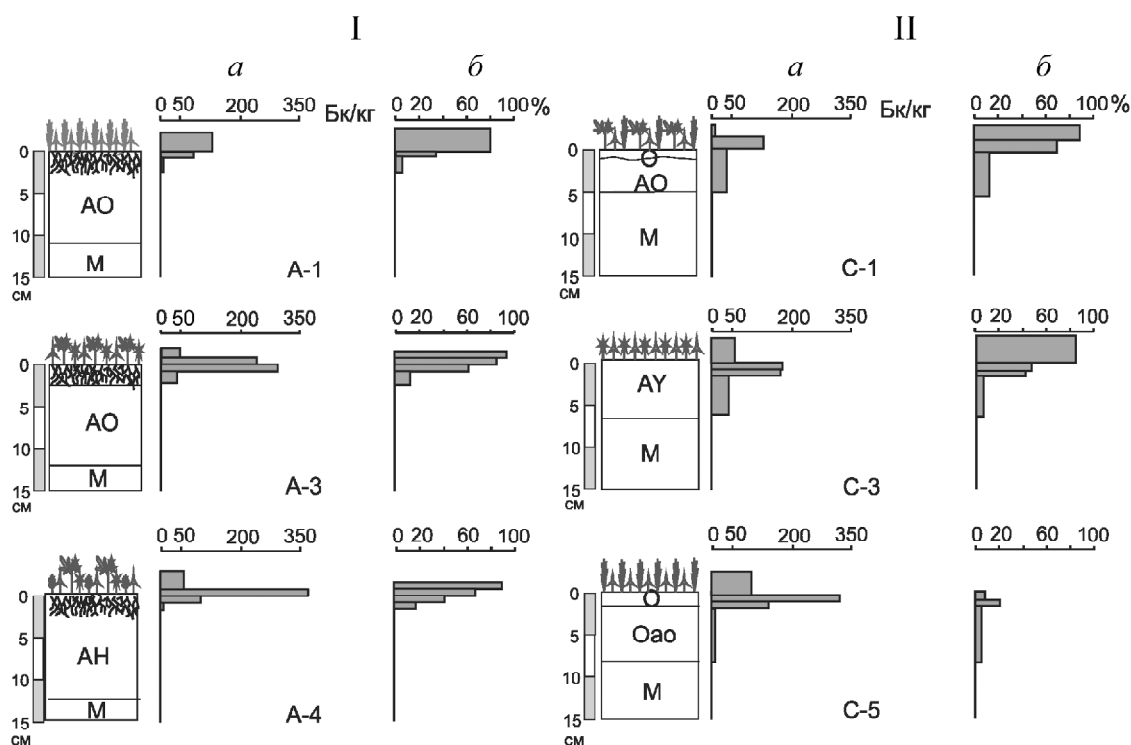


Рис. 2. Радиальное распределение удельной активности ^{137}Cs (a) и $\text{C}_{\text{орг}}$ (б) в ландшафтах побережий заливов Абросимова (I) и Степового (II). Названия горизонтов и почв даны по [Классификация..., 2004]. Обозначение растительности и местоположение почвенных разрезов см. на рис. 1

Fig. 2. Radial distribution of ^{137}Cs activity (a) and organic matter (b) in the landscapes of the coasts of Abrosimov and Stepovoy bays. Names of soils and soil horizons are given according to [Klassifikatsiya..., 2004]. Symbols of vegetation and location of the soil profiles see at Fig. 1

(ФК) доминируют над гуминовыми (ГК), отношение $C_{ГК}/C_{ФК}$ изменяется с севера на юг от 0,2–0,4 до 0,4–0,7 (табл. 1). Растворимость органического вещества [Орлов и др., 1996] составляет в почвах слабых ландшафтов 60–70%, кислых – 50–90%. Содержание негидролизуемого остатка (гумина) уменьшается от серогумусовых горизонтов с примесью грубогумусового материала к грубогумусовому от 30–50 до 12%. Среди фульвокислот преобладает лабильная фракция, наименьшее содержание свойственно фракции 1а, что типично для почв высокоарктической тундры [Горячкин, 2010]. Среди гуминовых кислот, представленных фракциями 1 и 3 в почвах кислых ландшафтов и практически всеми фракциями в почвах слабых ландшафтов, доминируют «свободные». Содержание гуминовых кислот, прочно связанных с минеральной основой, меняется от среднего к высокому; связанных с Са – от незначительного до низкого. Из-за усиления биологического круговорота степень гумификации органического вещества варьи-

рует от очень слабой до средней и в целом увеличивается от почв слабых к кислым арктическим ландшафтам.

В минеральном составе почв арктических ландшафтов преобладают кварц и глинистые минералы, значительно содержание полевых шпатов (табл. 2). Среди глинистых минералов доминируют иллит и хлорит, каолинит присутствует в небольшом количестве в большинстве случаев. Из-за подкисляющего воздействия растительности в прикорневых морфонах в 4,5 раза повышено содержание каолинита, формирующегося из гелей после разложения полевых шпатов, хлоритов и других минералов [Wilson, 2013]. Вероятно, в органогенных горизонтах почв значительная часть иллита также возникла в результате педогенного преобразования хлоритов. Среди изученных минералов наиболее высокая дисперсность иллита и особенно гипергенного иллита, что определяет их повышенную сорбцию по сравнению с другими глинистыми минералами. Несмотря на сходный состав, соотношение минералов

Таблица 1

Органическое вещество почв восточного побережья Новой Земли, %

Разрез, горизонт	$C_{орг}$	$C_{ГК}/C_{ФК}$	Фульвокислоты*				Гуминовые кислоты*			НО*	Доля фракций ГК относительно суммарного содержания ГК		
			1а	1	2	3	1	2	3		«свободные»	связанные с Са	прочные связанные
A-1, AYao	5,1	0,66	7,3	21,6	5,5	11,0	20,4	0	2,7	31,2	88	0	12
A-5, AYao	7,1	0,43	5,0	24,7	5,0	10,5	11,1	0	4,1	39,9	73	0	27
C-3, AYao	5,7	0,23	3,0	21,8	0,4	16,4	4,2	0	1,6	52,8	73	0	27
C-4, AY	6,3	0,21	4,4	25,6	5,6	13,8	7,3	0,2	1,1	37,5	85	2	13
C-5, Oao	4,9	0,41	6,2	27,3	18,2	15,4	10,5	7,2	3,7	11,9	49	34	17

Примечания. * Доля от суммарного содержания углерода органических веществ $C_{орг}$. Обозначения разрезов см. на рис. 1.

Таблица 2

Минеральный состав почв и осадков на восточном побережье Новой Земли, %

Компонент	Карбонаты	Полевые шпаты	Кварц	Каолинит	Иллит	Хлорит
Побережье и залив Абрисова						
Почвы* (9)	0	29,3	38,8	2,6	9,8	19,6
Почвы** (2)	0	29,8	36,4	11,7	12,7	9,4
Почвы*** (1)	0	26,8	39,6	2,5	21,9	9,3
Осадки (4)	0	28,7	35,7	1,2	17,6	16,9
Побережье и залив Степового						
Почвы* (10)	0	21,4	34,7	1,5	20,5	21,8
Залив Благополучия						
Осадки (12)	19,2	9,9	31,1	0,8	27,7	10,1
Залив Цивольки						
Осадки (4)	7,8	14,1	29,8	0,4	29,7	17,1

Примечания. В скобках – число проб. *Органогенные горизонты, **прикорневые морфоны, ***органоминеральные горизонты.

в почвах разных ландшафтов сильно варьирует. В почвах слабокислых ландшафтов по сравнению с кислыми арктотундровыми ландшафтами больше иллит и меньше полевых шпатов, что обусловлено, скорее всего, локальными особенностями почвообразующих пород. В органоминеральных горизонтах почв кислых арктотундровых ландшафтов понижено содержание хлорита (9,4%), в прикорневых морфонах повышено содержание каолинита (11,7%). Органогенные горизонты содержат в 2 раза больше хлорита, чем органоминеральные. В почвах слабокислых ландшафтов повышено содержание хлорита (21,8%).

Минеральный состав донных осадков заливов близок к составу почв (табл. 2), так как большая часть материала поступает из сухопутных ландшафтов в результате экзарационной деятельности ледника и с талыми водами. В осадках залива Абросимова повышена доля иллита, залива Благополучия – карбонатов.

Таким образом, несмотря на довольно низкие значения средней температуры и небольшое количество осадков, в арктотундровых ландшафтах на восточном побережье Новой Земли активно протекают процессы педогенной трансформации минерального и органического вещества.

Элементный состав. Макро- и микроэлементы. Почвообразующие породы арктотундровых ландшафтов относительно кларков литосферы обогащены Fe, Ti, Cr, V, Ni, As и обеднены P, S, Rb, Sr, Ba, Th, Nb, Cl (табл. 3). Коэффициент вариации (C_v) химических элементов в породах невысокий – 3–29%. В почвах Новой Земли из-за высокого содержания в материнских породах концентрация Cr, V, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, Ba, Pb в 2–12 раз больше, чем в тундрах России [Когобова et al., 2003; Величкин и др., 2012; Московченко, 2010; Сорокина и др., 2010]. Почвы относительно пород обогащены в 2–5 раз P, S, Cl, Cu, Pb, Zn, в них повышена вариабельность содержания Pb, As и биофильных S, Zn, Sr, Cl

($C_v=100\div420\%$), вероятно, из-за комплексности почвенного и растительного покрова. Почвы арктотундровых кислых ландшафтов с вероятностью 0,99 (по результатам t -теста различий среднего) содержат больше Ti и меньше Mn и Ba по сравнению со слабокислыми ландшафтами из-за неоднородности их содержания в почвообразующих породах.

В почвах слабокислых ландшафтов химические элементы распределены по латерали равномерно ($0,8 < L < 1,3$) за исключением биофильных P ($L=1,5$) и Cl ($L>2$), накапливающихся в подчиненных позициях (табл. 4). Латеральная дифференциация почв кислых арктотундровых ландшафтов более контрастна ($0,6 < L < 6,8$), вероятно, из-за повышенной длительности безморозного периода на более южном участке и интенсивной трансформации и миграции веществ. В транзлювиальном ландшафте повышено содержание As и Th ($L=1,9\div2,3$), что, вероятно, связано с изменением миграции элементов на склонах. В транзлювиально-аккумулятивном ландшафте подножия склона на биогеохимическом барьере накапливаются P, S, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb ($L=1,4\div2,9$). Из-за поступления с морской водой в подчиненных ландшафтах повышено содержание Cl ($L=6,8$).

На Новой Земле мхи содержат в 2–10 раз больше V, Co и в 10–20 раз больше Mn, Fe, Cr, Ni, Pb, чем на севере Западной Сибири [Valeeva, Moskovchenko, 2002], Шпицбергене [Wojtun et al., 2013] и в Чехии [Šakalys et al., 2009]. Вариабельность содержания химических элементов в растениях меньше, чем в почвах, и изменяется в пределах 28–150%. В растениях значения $C_v > 100\%$ обнаружены для биофильных Zn и Sr, а также Pb и повышены из-за анализа укоса всего растительного яруса, а не отдельных видов растений.

Мхи и лишайники арктотундровых ландшафтов Новой Земли преимущественно слабо накапливают изученные элементы. Ряды биологического поглощения в арктотундровых кислых ландшафтах име-

Таблица 3

Химический состав пород, почв и растений на восточном побережье Новой Земли

Участок	Макроэлементы, %					Микроэлементы, мг/кг																
	Ti	Mn	Fe	P	S	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Th	Y	Nb	Pb	As	Cl	
Растительность																						
A (8)	0,072	0,029	0,90	0,13	0,21	16	9,5	3,5	22	7,9	38	7,2	43	10	57	0,6	3,4	1,0	10	<2	213	
C (6)	0,083	0,050	1,05	0,20	0,56	4,5	3,3	1,4	7,4	5,0	20	3,2	36	3,8	26	0,271	1,6	0,47	2,5	<2	72	
Почвы																						
A (7)	0,75	0,12	8,3	0,23	0,21	216	180	24	157	59	135	88	125	189	441	8,5	41	13	52	18	164	
C (11)	0,50	0,22	7,3	0,24	0,38	208	206	40	145	107	214	104	133	210	829	8,5	41	12	78	20	144	
Породы																						
A (5)	0,67	0,09	7,4	0,044	0,002	238	191	18	155	36	91	77	100	181	405	8,0	33	12	20	14	44	
C (5)	0,61	0,19	7,9	0,039	0,048	186	208	25	154	54	135	99	84	179	682	8,0	40	13	28	15	43	
Кларк*	0,45	0,100	4,65	0,093	0,047	92**	121**	17	55	47	83	150	340	170	650	14	29	21	16	5,6**	170	

Примечания. В скобках – число проб. Содержание в растениях рассчитано на сухой вес. * По А.П. Виноградову [1962], ** по Н.А. Григорьеву [2009]. А – побережье залива Абросимова, С – побережье залива Степового. Полуторным выделены значения кларков концентрации >2 .

Таблица 4

Латеральная дифференциация верхних горизонтов почв на восточном побережье Новой Земли

Ландшафт	Ti	Mn	Fe	P	S	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Th	Y	Nb	Pb	As	Cl
Побережье залива Абросимова																					
Э*	7620	1279	82530	3036	3000	214	199	25	120	39	135	93	122	201	432	7	36	12	47	10	133
ТЭ	1,1	1,2	1,2	0,8	1,5	1,0	0,8	0,6	1,3	1,0	1,4	0,9	1,1	0,8	0,9	1,9	1,1	1,1	0,9	2,3	0,9
ТЭА1	0,9	1,2	0,9	2,4	2,9	0,9	0,9	2,0	1,8	2,0	2,9	1,1	2,2	0,9	1,4	1,3	1,2	1,1	1,8	1,2	6,8
ТЭА2	0,9	0,8	1,0	0,7	0,6	1,1	0,9	0,8	1,3	1,5	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,2	1,0	1,2	1,9	1,3
Побережье залива Степового																					
Э*	5040	2240	68880	1980	3320	207	205	46	134	99	232	91	176	202	763	12	40	11	67	18	134
ТЭ	1,1	0,9	1,0	1,5	1,4	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	1,0	1,0	1,3	0,9	0,8	0,6	0,9	1,1	1,1	1,1	2,2
ТЭА1	0,9	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	1,2	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	0,8	1,0	1,1	1,1	0,5	1,6
ТЭА2	1,0	1,0	1,2	1,1	1,2	1,0	1,1	0,9	1,2	1,1	0,9	1,2	0,7	1,1	1,1	0,9	1,2	1,1	1,3	1,3	1,1

Примечания. *мг/кг. Полу жирным выделены значения коэффициентов $L \leq 0,6$ и $L \geq 1,4$ в подчиненных ландшафтах.

ют следующий вид: $Cl_9-S, Zn, P_3-Sr, Pb_{2,3}-Mn, Co, Ni, Cu, Ba_{1,3-1,5}-Ti, Fe, Cr, V, Rb, Zr, Th, Nb, As_{0,9-1,0}$, в слабых – $Cl_{10}-(S, P, Sr)_{4-5}-Zn_{1,6}-Mn, Ni, Cu, Th_{0,9-1,0}-Ti, Fe, Ba, Nb, Pb, As_{0,7-0,8}-Y, Rb_{0,6}-Cr_{0,5}-V, Zr_{0,4}$, где цифрами обозначены значения коэффициента биологического поглощения. В кислых ландшафтах Pb, Mn, Co, Ba, Ni, Cu относятся к группе элементов слабо биологического поглощения ($Ax=1,3 \div 2,3$), а в слабых ландшафтах – биологического захвата ($0,7-1,0$). Общая биогеохимическая специализация растений арктических ландшафтов восточного побережья Новой Земли – аккумуляция S, P, Cl, Sr, Zn (табл. 3).

Таким образом, ландшафты Новой Земли обладают слабым потенциалом аккумуляции химических элементов. В почвах относительно пород аккумулируются P, S, Cl, Cu, Pb, Zn. Растительность слабо накапливает биогенные S, P, Cl, Sr, Zn.

Радионуклиды. В растительности на восточном побережье Северного и Южного островов содержание природных изотопов низкое: активность ^{40}K варьирует от 0 до 170 Бк/кг при среднем 77 Бк/кг, ^{226}Ra и ^{232}Th – не превышает 6 Бк/кг. В почвах о. Южный содержание природных изотопов увеличивается с глубиной и в среднем составляет для ^{40}K 354 Бк/кг в верхней части профиля и 448 Бк/кг – в нижней, для ^{226}Ra – 12–17 Бк/кг и для ^{232}Th – 15–21.

В донных осадках заливов удельная активность природных изотопов при пониженной вариабельности больше, чем в почвах побережий, что отражает повышенный вынос этих радионуклидов с твердофазным материалом из сухопутных ландшафтов в результате механической миграции. В заливе Абросимова средняя активность ^{40}K составляет 503 ± 16 , ^{226}Ra – $17 \pm 1,5$ и ^{232}Th – $16 \pm 1,2$ Бк/кг. В осадках заливов острова Северный в 1,3–2,3 раза повышено содержание всех природных радионуклидов по сравнению с заливами о. Южный. В донных осадках залива Благополучия средняя активность ^{40}K составляет 758, ^{226}Ra – 30, ^{232}Th – 29 Бк/кг. В донных осад-

ках залива Цивольки вариабельность ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th значительно больше, чем в заливе Благополучия при пониженной активности ^{40}K (648 Бк/кг), повышена у ^{226}Ra (41 Бк/кг) и приблизительно такая же у ^{232}Th (29 Бк/кг). Радиальное распределение природных изотопов равномерное.

Примитивно-пустынные ландшафты побережий заливов Благополучия и Цивольки обладают очень слабым потенциалом аккумуляции радионуклидов. Зеленомошные сообщества с низкой площадью проективного покрытия содержат в среднем 25–45 Бк/кг ^{137}Cs и по аналогии с более южными тундровыми ландшафтами [Semenkov et al., 2015] при сходных величинах активности не являются значимыми депозитариями радионуклидов.

В арктических ландшафтах восточного побережья о. Южный повышена удельная активность ^{137}Cs (100–300 Бк/кг) в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе и верхнем сантиметровом слое почвы (рис. 2) с высоким содержанием $C_{орг}$. Уровень содержания ^{137}Cs в зеленых мхах Новой Земли в 2–5 раз больше, чем в фоновых ландшафтах на севере Западной Сибири [Щербов и др., 2000; Семенов, Усачева, 2013], что, по-видимому, связано с поступлением радионуклидов в ландшафты из-за локальных радиоактивных выпадений после ядерных испытаний. Удельная активность ^{137}Cs в нижних частях живых мхов в 5–6 раз больше, чем в верхних (рис. 2), и близка к уровню активности в верхнем сантиметровом слое почвы. В нижележащей 5-сантиметровой толще почв его активность уменьшается в среднем в 7 раз.

В отличие от природных изотопов максимальная удельная активность ^{137}Cs в донных осадках характерна для заливов о-ва Южный, что связано с интенсификацией миграции на более южных территориях архипелага. Максимум активности ^{137}Cs в донных осадках заливов о. Южный (15–26 Бк/кг) находится на глубине 8–10 см. Осадки в заливе Цивольки характеризуются двумя максимумами: на

глубине 6–7 см (5 Бк/кг) и 12–14 см (9 Бк/кг). В осадках о. Северный активность ^{137}Cs не превышает 10 Бк/кг. Сходная, но менее контрастная дифференциация выявлена в осадках залива Благополучия, где первый максимум ^{137}Cs приходится на глубину 9–11 см, а второй – на 13 см.

В почвах и донных осадках заливов Новой Земли ^{137}Cs прочно сорбируется преимущественно глинистыми частицами на поверхности и боковых склонах иллитов, что определяет слабую миграцию радионуклидов в донные осадки.

Выводы:

– на восточном побережье арх. Новая Земля выявлена зональная смена ландшафтов от примитивных лишайниковых пустошей на почвопленках Северного острова к арктотундровым слабокислым и кислым мохово-лишайниковым ландшафтам на литоземах и петроземах Южного о-ва, проявляющаяся в увеличении мощности почвенного профиля, кислотности, степени гумификации, отношения $C_{\text{ГК}}/C_{\text{ФК}}$ и уменьшении скелетности почв;

– в минеральном составе почв преобладают кварц и полевые шпаты, выявлено довольно высокое содержание иллитов и хлоритов и незначительное содержание каолинита. В результате педогенной трансформации почвообразующих пород в кислой среде прикорневых морфонов образуется каолинит, а в мелкоземном слое почвенного профиля – иллит;

– почвы арктотундровых ландшафтов на восточном побережье о. Южный отличаются повышенным содержанием Cr, V, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb из-за местного геохимического фона. Биогенные элементы (S, P, Cl, Sr, Zn) слабо накапливаются растительностью; Fe, Ti, Cr, V, Rb, Zr, Th, Nb, As принадлежат к группе слабого биологического захвата;

– природные радионуклиды накапливаются почвами и донными осадками, а ^{137}Cs – почвами и растительностью. Удельная активность ^{137}Cs в ландшафтах на восточном побережье Новой Земли в 2–3 раза больше, чем в тундровых ландшафтах Западной Сибири.

Благодарности. Исследования выполнены за счет гранта РНФ (№ 14-17-00764). Количественный минеральный анализ выполнен на оборудовании, приобретенном за счет средств Программы развития Московского университета имени М.В. Ломоносова.

Авторы благодарны Е.В. Терской, Л.В. Добрыдневой и П.П. Кречетову за консультации по вопросам, связанным с фракционированием гумуса, В.М. Феодорову – за определение состава фитоценозов, Е.Н. Борисенко и Н.С. Касимову – за конструктивное обсуждение результатов и критические замечания при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунукина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- Величкин В.И., Кузьменкова Н.В., Кошелева Н.Е. и др. Оценка эколого-геохимического состояния почв на северо-западе Кольского полуострова // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геохронология. 2012. № 1. С. 41–50.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Горячкин С.В. Почвенный покров севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Иванов Г.И. Методология и результаты экогеохимических исследований Баренцева моря. СПб.: ВНИИ Океанология, 2002. 153 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Мирошников А.Ю. и др. Геохимическая структура и радиационное состояние прибрежных ландшафтов заливов Карского моря Новой Земли // Докл. РАН. 2016. Т. 468, № 3. С. 328–331.
- Мирошников А.Ю. Закономерности распределения радионуклидов в донных отложениях Карского моря // Геоэкология. 2012. № 6. С. 516–526.
- Михайлов В.Н. Ядерные испытания в Арктике: В 2-х кн., М.: ОАО «Московские учебники». 2006. Т. 1. 463 с; Т. 2. 455 с.
- Московченко В.Д. Геохимия ландшафтов севера Западно-Сибирской равнины: структурно-функциональная организация вещества геосистем и проблемы экодиагностики: Автореф. докт. дисс. СПб.: 2010. 33 с.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.
- Семенов И.Н., Усачева А.А. Цезий-137 как маркер современных почвенных турбаций // Фундаментальные исследования. 2013. № 10, вып. 7. С. 1478–1481.
- Сорокина Е.П., Дмитриева Н.К., Карпов Л.К., Трихалина Н.Ю. Анализ регионального геохимического фона как основа эколого-геохимического картирования равнинных территорий: на примере северной части Западно-Сибирского региона // Прикладная геохимия. Экологическая геохимия. 2001. № 2. С. 316–338.
- Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Маликова И.Н. и др. Сравнительная характеристика современного радиоактивного загрязнения территорий Западной Сибири, прилегающих к Семипалатинскому и Новоземельскому полигонам (на примере Алтая и Пур-Тазовского междуречья) // Сибирский экол. журн. 2000. № 1. С. 51–60.
- Aarkrog A.A. Retrospect of Anthropogenic Radioactivity in the Global Marine environment // Radionuclides in the Oceans (Proceed. of Part 1 of the Intern. Symp. RADOX-96/97: Inventories, Behaviour and Processes. Cherbourg-Octeville, France, 7–11 October 1996) // Radioprotection. 1997. Vol. 32, N 2. P. 23–31.
- Korobova E.M., Ukraintseva N.G., Surkov V.V., Brown J.B. Geochemical study of the tundra landscapes in the Yenisey delta

and gulf area // Safety and Reliability: Proceed. of the ESREL. Maastricht, 2003. P. 601–606.

Šakalys J., Kviatkus K., Sucharova J. et al. Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005 // Chemosphere. 2009. N 76(1). P. 91–97.

Semenkov I., Usacheva A., Miroshnikov A. Distribution of global fallouts cesium 137 in taiga and tundra catenae at the Ob river basin // Geology of Ore Deposits. 2015. Vol. 57, N 2. P. 138–155.

Valeeva E.I., Moskovchenko D.V. Trace element composition of lichens as an indicator of atmospheric pollution in Northern West Siberia // Polar Geography. 2002. N 26(4). P. 249–269.

Wilson M.J. Rock-forming Minerals. Sheet Silicates // Clay Minerals. Geol. Soc. 2013. Vol. 3. 724 p.

Wojtun B., Samecka-Cymerman A., Kolon K. et al. Metals in some dominant vascular plants, mosses, lichens, algae, and the biological soil crust in various types of terrestrial tundra, SW Spitsbergen, Norway // Polar Biology. 2013. N 36. P. 1799–1809.

Поступила в редакцию 11.03.2016

Принята к публикации 26.07.2016

A.A. Usacheva¹, I.N. Semenov², A.Yu. Miroshnikov³,
V.V. Krupskaya⁴, S.V. Zakusin⁵

GEOCHEMICAL FEATURES OF ARCTIC TUNDRA LANDSCAPES OF THE NOVAYA ZEMLYA EASTERN COAST

The main morphological and physical-chemical characteristics of soils (the mineral and elemental composition, pH, carbon organic matter content and its fractional-group composition, the radiation condition) were investigated in the arctic tundra landscapes of the Novaya Zemlya archipelago. Quartz and feldspars dominate in soils, pedogenetic illite and kaolinite are formed in the acid environment, and medium to high quantity of humus of humate-fulvate composition is typical. Soil-forming rocks of the Abrosimov and Stepovoy bays coasts are enriched in Fe, Ti, Cr, V, Ni, As, and depleted in P, S, Rb, Sr, Ba, Th, Nb and Cl. Plants of the arctic tundra landscapes accumulate S, P, Cl, Sr and Zn. The activity of natural isotopes (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K) increases from the vegetation to soils and finally bottom sediments. ¹³⁷Cs activity varies in between 10–350, 1–310 and 0–26 Bq kg⁻¹ in plants, soils and sediments, respectively.

Key words: catena, landscapes, soils, bottom sediments, heavy metals, radionuclides, clay minerals, illite, kaolinite, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th, the Novaya Zemlya archipelago.

Acknowledgements. The study was supported by Russian Science Foundation (project № 14-17-00764). Quantitative mineral analysis was carried out using the equipment covered by the funds of the MSU Development Program.

The authors wish to express their gratitude to E.V. Terskaya, L.N. Dobrydneva and P.P. Krechetov for their consultations on the humus fractioning, to V.M. Feodoritov for the analysis of phytocenoses composition and to E.N. Borisenko and N.S. Kasimov for the constructive discussion of the results and the critical comments to the article.

REFERENCES

Aarkrog A.A. Retrospect of Anthropogenic Radioactivity in the Global Marine Environment // Radionuclides in the Oceans (Proceedings of Part 1 of the Intern. Symp. RADOC-96/97: Inventories, Behaviour and Processes. Cherbourg-Octeville, France, 7–11 October 1996 // Radioprotection. 1997. Vol. 32, N 2. P. 23–31.

Arinushkina E.V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv [Guide to Chemical analysis of soil], Moscow, Izd-vo MGU, 1970, 487 p. (in Russian).

Gorjachkin S.V. Pochvennyj pokrov severa (struktura, genezis, jekologija, jevoljucija) [The soil cover of the North (structure,

genesis, ecology, evolution)], Moscow, GEOS, 2010, 414 p. (in Russian).

Grigor'ev N.A. Raspredelenie himicheskikh jelementov v verhnjej chasti kontinental'noj kory [The distribution of chemical elements in the upper continental crust], Ekaterinburg, UrO RAN, 2009, 382 p. (in Russian).

Ivanov G.I. Metodologija i rezul'taty jekogeohimicheskikh issledovanij Barenceva morja [The methodology and the results of ecogeochemical studies of the Barents Sea], SPb., VNI Okeanologija, 2002, 153 p. (in Russian).

¹ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Laboratory of Radiogeology and Radiogeocology, Junior Scientific Researcher; e-mail: usacheva@list.ru

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Laboratory of Radiogeology and Radiogeocology, Junior Scientific Researcher; e-mail: semenov@igem.ru

³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Laboratory of Radiogeology and Radiogeocology, Senior Scientific Researcher, PhD in Geology; e-mail: almir@igem.ru

⁴ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Laboratory of Crystal Chemistry of Minerals, Senior Scientific Researcher; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Engineering and Ecological Geology, Senior Scientific Researcher, PhD in Geology; e-mail: vi_kru@bk.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Engineering and Ecological Geology, Leading Engineer; Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Laboratory of Crystal Chemistry of Minerals, Junior Scientific Researcher; e-mail: sergeyzakusin@gmail.com

- Kasimov N.S., Vlasov D.V.* Klarki himicheskikh jelementov kak jetalony sravnenija v jekogeochemii [Clarks of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry], *Vestnik Moskovskogo universiteta, Serya 5, Geografija*. 2015, no 2, pp. 7–17 (in Russian).
- Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnosis of Russian soil], Smolensk, Ojkumena, 2004, 342 p. (in Russian).
- Korobova E.M., Ukraintseva N.G., Surkov V.V., Brown J.B.* Geochemical study of the tundra landscapes in the Yenisey delta and gulf area // *Safety and Reliability: Proceed. of the ESREL. Maastricht*, 2003. P. 601–606.
- Laverov N.P., Velichkin V.I., Miroshnikov A.Yu.* et al. Geohimicheskaja struktura i radiacionnoe sostojanie pribrezhnyh landshaftov zalivov Karskogo morja Novoj Zemli [Geochemical structure and radiation state coastal landscape of the Kara Sea bays, Novaja Zemlja], *Doklady akademii nauk*, 2016, t. 468, no 3, pp. 328–331 (in Russian).
- Mihajlov V.N.* Jadernye ispytaniya v Arktike: Nauchno-publicisticheskaja monografija v dvuh knigah [Nuclear testing in the Arctic: Scientific publicist monograph in two books], Moscow, OAO «Moskovskie učebniki», 2006, vyp. 1, 463 p.; vyp. 2, 455 p. (in Russian).
- Miroshnikov A.Yu.* Zakonomernosti raspredelenija radioceziya v donnyh otlozhenijah Karskogo morja [Regularities of distribution of radioactive cesium in the sediments of the Kara Sea], *Geojekologija*, 2012, no 6, pp. 516–526 (in Russian).
- Moskovchenko V.D.* Geohimija landshaftov severa Zapadno-Sibirskoj ravniny: strukturno-funkcional'naja organizacija veshhestva geosistem i problemy jekodiagnostiki [Geochemistry of landscapes of the north of the West Siberian Plain: structural and functional organization of geosystem substance and ecodiagnostic problems], *Avtoref. dokt. geogr. nauk*, 2010, 33 p. (in Russian).
- Orlov D.S., Birjukova O.N., Suhanova N.I.* Organicheskoe veshhestvo pochv Rossijskoj Federacii [The organic matter of soil of the Russian Federation], Moscow, Nauka, 1996, 256 p. (in Russian).
- Perel'man A.I., Kasimov N.S.* Geohimija landshafta [Geochemistry of landscape], Moscow, Astreja-2000, 1999, 610 p. (in Russian).
- Šakalys J., Kviatkus K., Sucharova J.* et al. Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005 // *Chemosphere*. 2009. N 76(1). P. 91–97.
- Semenkov I.N., Usacheva A.A., Miroshnikov A.Yu.* Distribution of global fallouts cesium137 in taiga and tundra catenae at the ob river basin // *Geology of Ore Deposits*. 2015. Vol. 57, N 2. P. 138–155.
- Semenkov I.N., Usacheva A.A.* Cezij-137 kak marker sovremennyh pochvennyh turbacij [Cesium-137 as a marker of current soil turbation], *Fundamental'nye issledovaniya*, vyp. 7, no 10, 2013, pp. 1478–1481 (in Russian).
- Shherbov B.L., Strahovenko V.D., Malikova I.N.* et al. Sravnitel'naja harakteristika sovremennogo radioaktivnogo zagruznenija territorij Zapadnoj Sibiri, prilagajushhih k Semipalatinskomu i Novozemel'skomu poligonam (na primere Altaja i Pur-Tazovskogo mezhdurech'ja) [Comparative characteristics of current contamination of Western Siberia of areas adjacent to the Semipalatinsk and Novaya Zemlya polygons (by the example of the Altai and Pur-Taz interfluvial)], *Sibirskij jekologičeskij žurnal*, 2000, no 1, pp. 51–60 (in Russian).
- Sorokina E.P., Dmitrieva N.K., Karpov L.K., Trihalina N.Ju.* Analiz regional'nogo geohimicheskogo fona kak osnova jekologo-geohimicheskogo kartirovaniya ravninnyh territorij: na primere severnoj chasti Zapadno-Sibirskogo regiona [Analysis of the regional geochemical background as a basis for ecogeochemical mapping lowland areas: by the example of the northern part of the West Siberian region], *Prikladnaja geohimija, jekologičeskaja geohimija*, 2001, no 2, pp. 316–338 (in Russian).
- Valeeva E.I., Moskovchenko D.V.* Trace element composition of lichens as an indicator of atmospheric pollution in Northern West Siberia // *Polar Geography*. 2002. N 26(4). P. 249–269.
- Velichkin V.I., Kuz'menkova N.V., Kosheleva N.E.* et al. Ocenka jekologo-geohimicheskogo sostojaniya pochv na severo-zapade Kol'skogo poluostrova [Assessment of ecological and geochemical state of soils in the northwest of the Kola Peninsula], *Geojekologija, inženernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija*, 2012, no 1, pp. 41–50 (in Russian).
- Vinogradov A.P.* Srednee sodержanie himicheskikh jelementov v glavnyh tipah izverzhennyh porod zemnoj kory [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the crust], *Geohimija*, 1962, no 7, pp. 555–571 (in Russian).
- Wilson M.J.* Rock-forming Minerals. Sheet Silicates // *Clay Minerals*. Geol. Soc. 2013. Vol. 3, 724 p.
- Wojtun B., Samecka-Cymerman A., Kolon K.* et al. Metals in some dominant vascular plants, mosses, lichens, algae, and the biological soil crust in various types of terrestrial tundra, SW Spitsbergen, Norway // *Polar Biology*. 2013. N 36. P. 1799–1809.

Received 11.03.2016

Accepted 26.07.2016